

氏 名	もろ 諸 と 戸 のぶ 靖 ちか 史
授 位 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 1 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻（博士課程）
学位論文題目	粒状体の変形と強度に関する基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 河上 房義
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 河上 房義 東北大学教授 多谷 虎男 東北大学教授 後藤 幸正 東北大学教授 佐武 正雄

## 論 文 内 容 要 旨

砂のような粒状体はダイレイタンス特性を有する摩擦性弾塑性体として複雑な挙動をする。一般に地盤や土構造物の境界値問題のとりあつかいにおいて、土の応力・ヒズミ関係が知られなければ問題を静定化できない。一方、砂やレキからなる地盤や斜面の安定解析においては、粒状体のせん断抵抗角を知らなければ極限設計を行なうことができない。砂のような粒状体の変形と強度に関する基礎的研究は土をとりあつかう工学の分野からの要請である。

現在、粒状体の変形に関する基本的理解が十分ではなく、粒状体の応力・ヒズミ関係の設定に関する不明の点も多大に存在している。また、粒状体のせん断抵抗角の意味あるいはせん断抵抗角と密度特性の間の基本関係も明らかになっていない。さらに設計上の重要問題である粒状体のせん断抵抗角に与える中間主応力の効果についても明確な解答が得られていない。

そこで本研究は粒状体の変形に関して、三軸圧縮試験 ( $\sigma'_1 > \sigma'_2 = \sigma'_3$ ) から得られた基本的特

性を注視することにより，新たな状態関数を導入し粒状体のせん断変形に対する理解を深めるとともに粒状体の変形を系統的に考察し記述しようとするものである。また本研究は粒状体のせん断強度特性と密度特性の関係およびせん断強度に与える中間主応力の影響を調べ粒状体を工学材料としてとりあつかったり，強度定数を決定したりする場合に必要な基礎的な知見を得ようとするものである。

第1章「緒論」においては本研究の目的および考察の範囲について述べ，粒状体の力学的特質についてまとめている。

第2章「三軸圧縮試験における粒状体のせん断変形の基本的性質」においては，ガラスビーズについて三軸圧縮試験を行って粒状体のせん断変形の基本的な特質を実験的に把握している。自然の砂やレキに比べ単純な材料であるガラスビーズのせん断変形特性を知ることは粒状体のせん断変形の原形を把握する上で重要である。実験結果によると，ガラスビーズのような材料の塑性せん断変形は基本的には応力比によって支配されるものであった。

第3章「粒状体のせん断変形における状態関数の導入」においては，粒状体固有の力学的特質を注視することにより，せん断変形において外力のなす塑性仕事は経路に大きく依存することを明示し，新たな状態関数を導入定義できることを数理的に予見している。そして，ガラスビーズや砂の実験事実に基づいてその予見の妥当性を示している。また導入状態関数の力学的意味について述べている。

本論文で新しく導入された状態関数  $S_s$  は粒状体のせん断変形の基本的性質をふまえて導入されたスカラー量であり，次のように定義されている。

$$dS_s = \frac{dW_s^P}{p'}$$

$$= dV_d^P + \xi d\epsilon^P$$

ここに  $p'$  : 平均主応力,  $\frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$

$q$  : 偏差応力,  $\sigma_1 - \sigma_3$

$\eta$  : 応力比,  $q/p'$

$V_d^P$  : ダイレイタンスーによる体質ヒズミ

$\epsilon^P$  : 塑性せん断ヒズミ,  $\frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3)$

$dW_s^P$  : 外力のなす塑性せん断仕事  $p' dV_d^P + q d\epsilon^P$

この関数  $S_s$  は粒状体のせん断変形の進み具合を経路にかかわらず規定する量であり，

応力比  $\times$  せん断ヒズミ

で示される形式が粒状体の変形を考察していく上で重要となることが知られた。また関数  $S_s$  は粒状体内の粒子の乱れと関連していることが示唆された。

第4章「導入状態関数に関するエントロピーの概念の適用」においては、導入状態関数の性質を考察することにより巨視的な観点から粒状体のエントロピーを定義している。また、微視的な観点から間ゲキ分布エントロピー $H$ を新しく定義している。そしてその両者のエントロピーの関連を調べている。粒状体が再配列している変形領域では $S_s$ と $H$ の間に直接的な関係があることが従来のデータから読み取れた。このことはマイクロとマクロを関連づける一つの手法の開拓を試みたものである。

第5章「導入状態関数の性質に基礎を置く塑性セン断変形則の構成および考察」においては、導入状態関数の性質を用いて、粒状体の塑性セン断変形則の構成を系統的に行っている。また、従来の理論；特に最上の粒状体の力学理論における状態関数 $F(e^{-kr})$ と本論文における導入状態関数 $S_s$ との関連を示している。

土の塑性変形則を構成する方法の一つに金属塑性論の流れをくむものがある。

Cambridge 大学で体系的に整えられてきた土の変形理論はこの方法に拠っている。しかし、粒状体のセン断変形のとりあつかいとしては不満が多い。そこで、状態関数 $S_s$ を塑性セン断変形を規定する条件とし、 $S_s$ の存在条件である応力比・ヒズミ増分比関係式から塑性ポテンシャル $\varphi$ を定め、 $S_s$ と $\varphi$ の両関数を用いた新たな安定条件を提案した。この方法は系統的でかつ現実的であり、排水試験ばかりではなく非排水試験にも適用できることから、粒状体の塑性セン断変形則の構成上興味あるように思われた。

また、最上の粒状体理論に対する内外の評価は定かでない。その理論の基本的内容について状態関数 $S_s$ の性質を用いて考察し、最上の仮定する状態関数 $F(e^{-kr})$ と $S_s$ の間に関数関係があることを示すことができた。

第6章「応力増分・ヒズミ増分関係式の実験的設定」においては、shear と consolidation の両方を考慮した粒状体の応力増分・ヒズミ増分関係を砂の弾性的な変形に対して実験的に設定している。また塑性と弾性の両方を含む全変形の基本的性質について応力増分・ヒズミ増分関係式を設定することにより考察している。

セン断ばかりではなく consolidation をも考慮して粒状体の応力・ヒズミ関係を記述していく必要がある場合がある。砂の弾性的な変形における応力増分・ヒズミ増分関係を実験的に設定した。このことは、従来単一の応力経路で表現されていた粒状体の変形特性を総合的に記述する方法を示したものである。また全変形に対して応力増分・ヒズミ増分関係式を設定することにより定体積分応力経路、等セン断ヒズミ応力経路の意味が明らかになった。

第7章「粒状体のセン断強度定数と密度特性」においては、各研究者が行った砂・レキに関する資料を広範囲に調査することにより、粒状体の密度特性とセン断強度定数の間に基本的な関係が存在することを見いだすと共に、現在行なわれていない砂・レキ材の工学的分類のための一図

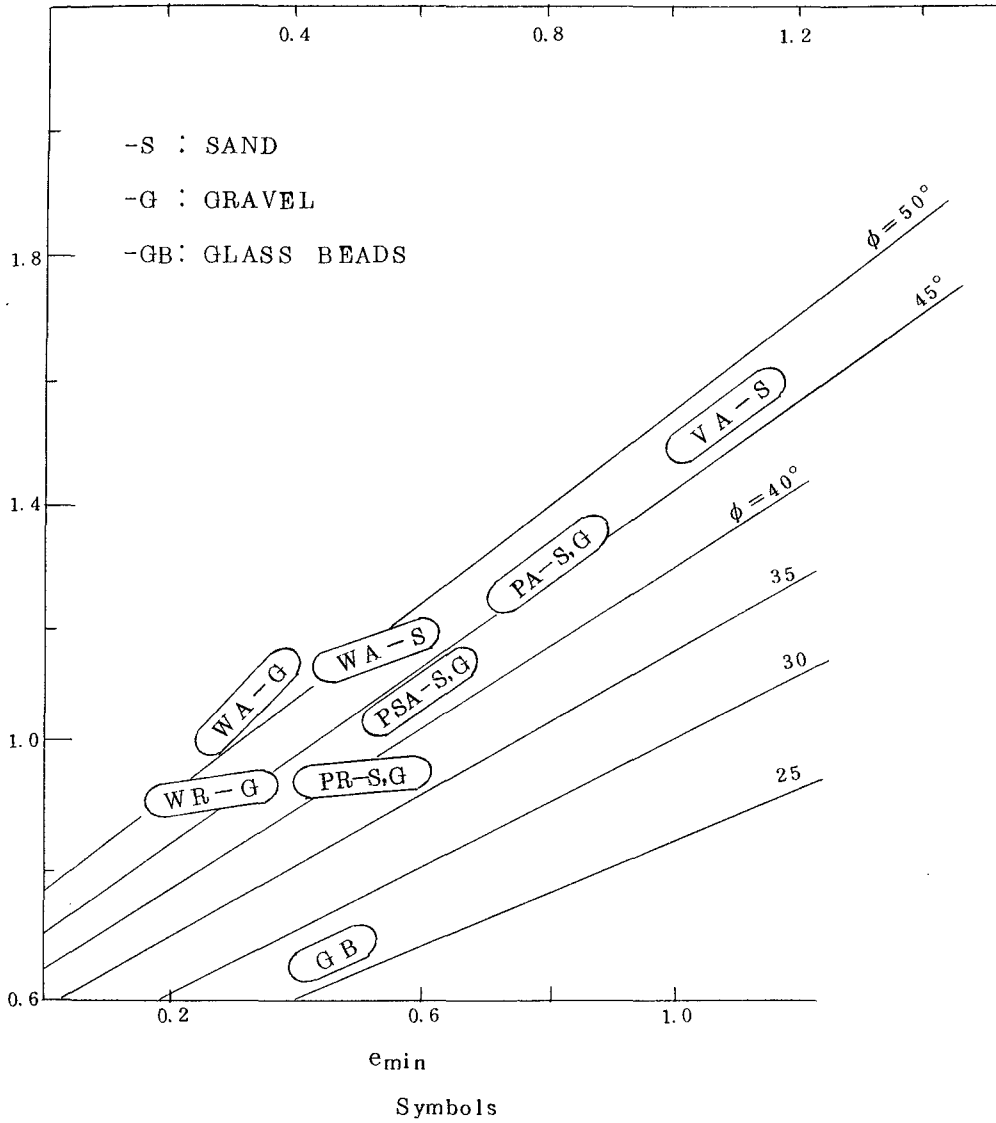
表を作成している。

砂のような粒状体のせん断強度特性と密度特性の関係は基本的な問題であるのかかわらずあまり調べられていない。そこで各研究者の報告している結果を広範囲に調査し、強度定数 $\bar{k}$ と最小間ゲキ比 $e_{min}$ の間に良い相関関係があることを見いだした。この $\bar{k}-e_{min}$  関係は粒子物性をパラメタにして直線関係を示した。このことから砂のような材料の工学的分類のための図表が可能となった(図-1)。砂のような材料に対しては単に粒径によって工学的分類が行われているが、この $\bar{k}-e_{min}$  図を用意すると、shear と consolidationにおける基本的な工学的指標であるせん断抵抗角と最大密度特性を考慮して粒子の物性を特徴づけることができた。

第8章「粒状体のせん断強度に与える中間主応力の影響」においては、砂のせん断抵抗角に与える中間主応力の影響を三主応力試験において系統的に調べ、その特性を明らかにしている。また、三軸圧縮と平面ヒズミ状態におけるせん断抵抗角の関係を示している。

粒状体のせん断抵抗角 $\phi$ に与える中間主応力の効果は図-2のようであった。供試体の粗密によって $\phi$ に与える中間主応力の効果が変わる理由としてダイレイタンスを根拠とすることができた。三軸圧縮試験におけるせん断抵抗角 $\phi_t$ と平面ヒズミ状態におけるせん断抵抗角 $\phi_p$ の間に一義的な関係があることを見いだした。また、 $\phi$ にはpath-insensitiveな性質があることを示した。これらは実際の設計にあたって重要な知見である。

第9章「結論」では本研究の結果を要約している。



VA: Very angular	PR: Poorly graded rounded
PA: Poorly graded angular	WA: Well graded angular
PSA: Poorly graded Subangular	WR: Well graded rounded

図-1 粒状材料の工学的分類のための  $\bar{k}-e_{min}$  関係図

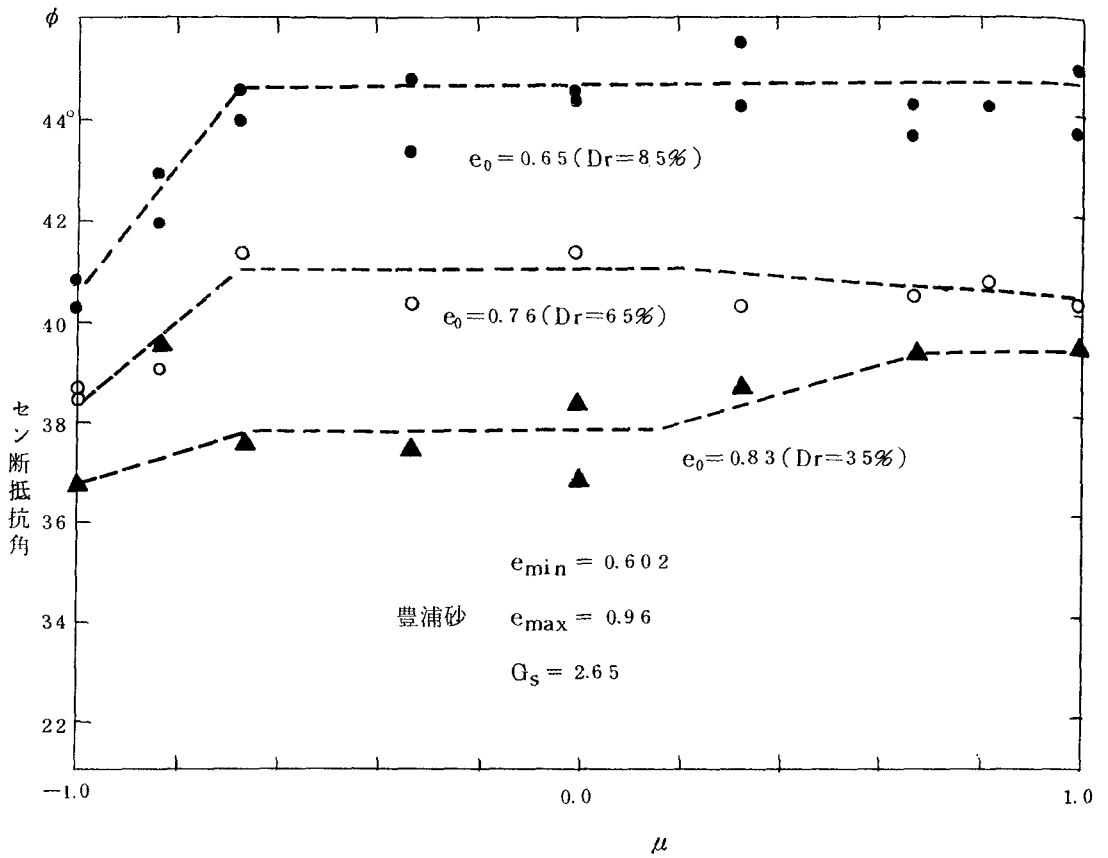


図-2 セン断抵抗角  $\phi$  に与える中間主応力の効果

## 審査結果の要旨

一般に地盤や土質構造物の力学的問題を取扱うには、土の応力・ひずみ関係が明らかにされている必要があり、また地盤や土質構造物の斜面の安定解析において極限設計を行うには、土のせん断強度を知ることが必要である。したがって土のせん断変形と強度に関する研究は従来から数多く行われており、今日でもなお重要な課題である。一方、土質力学においては、これまで土を砂や礫のような粗粒のもの、粘土のような細粒のものに分けて考えることが伝統的に行われている。この中、砂のような粒状体はダイレイタンスー特性を有する摩擦性弾塑性体として複雑な挙動を示し、そのせん断変形特性や強度特性、応力・ひずみ関係などについては不明な点が少なくない。この論文は、砂や礫のような粘着力のない粒状体のせん断変形と強度について行った基礎的研究の成果をとりまとめたもので、全編9章から成る。

第1章は緒論である。

第2章はガラスビーズを用いて行った三軸圧縮試験の結果に基づいて、粒状体のせん断変形に関する基本的性質に関する考察を述べている。

第3章は、粒状体のせん断変形の基本的特性を考慮した結果、新たな状態関数を導入して粒状体の塑性せん断変形を定めうることを理論ならびに実験に基づいて示し、その状態関数の力学的意味について述べている。これは土質工学上有用な知見である。

第4章は、上記の状態関数の性質を考察することによって、粒状体の巨視的な観点からのエントロピーと、微視的な観点からの間げき分布エントロピーとを定義し、両者の関連について述べている。

第5章は、状態関数の性質を用いて、粒状体の塑性せん断変形に関する法則を系統的に構成している。

第6章は、砂の弾性的な変形特性を調べて、粒状体のせん断と圧縮を共に考慮できる形の応力増分・ひずみ増分の関係式を決定している。

第7章は、砂や礫などの土の密度とせん断抵抗角の関係を詳しく調べ、せん断強度定数と密度定数と密度特性の関係を明らかにし、このような材料の工学的分類のために用いる図表を作成している。

第8章は、三主応力を別々に制御できる強度試験を行い、砂のせん断強度に与える中間主応力の影響を明らかにしている。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、砂のような粒状体のせん断変形および強度特性に関して、系統的に考察を行い、幾つかの新しい知見を加えたもので、土質力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。